

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2017.09.002

陈东东,王晓东,王森,等.四川省潜在蒸散量变化及其气候影响因素分析[J].中国农业气象,2017,38(9):548-557

四川省潜在蒸散量变化及其气候影响因素分析*

陈东东^{1,2}, 王晓东³, 王 森⁴, 栗晓玮⁵

(1.中国气象局成都高原气象研究所/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072; 2.四川省农业气象中心, 成都 610072; 3.安徽省农业气象中心, 合肥 230031; 4.新疆农业气象台, 乌鲁木齐 830002; 5.重庆第二师范学院, 重庆 400065)

摘要: 潜在蒸散 (ET_0) 是评价某一地区干旱程度的重要指标, 在全球气候变暖趋势下, 估计 ET_0 的变化对科学估算作物需水量, 提高水分利用率具有重大意义。本文利用四川省 1961–2014 年 151 个气象站的气象资料, 采用 Penman–Monteith 公式分 3 个区域 (四川盆地、攀西地区和川西高原) 计算 ET_0 , 并对主要气象因子平均气温、相对湿度、日照时数、平均风速的相对变化率、敏感系数及其对 ET_0 贡献率的时空变化进行分析。结果表明: 四川盆地和川西高原 ET_0 呈现微弱减少, 而攀西地区则呈现一定的增加, 其空间分布表现为: 攀西地区和川西高原南部年 ET_0 为高值区, 多在 1000~1350mm, 四川盆地的西南部年 ET_0 为低值区, 多在 651~900mm, 从西南向东北呈现“高-低-高”趋势。各气象因子对 ET_0 的影响 (对 ET_0 变化的贡献率) 主要取决于敏感性和相对变化率两方面。3 个区域 ET_0 对相对湿度的变化均表现最敏感, 其敏感系数分别为 -1.13、-1.40、-1.53。在主要气象因子中, 在四川盆地和攀西地区, 平均风速的多年相对变化率最大 (-29.7%、-16.3%), 川西高原则为平均温度 (40.4%)。进一步分析得出, 平均风速在四川盆地和川西高原对 ET_0 变化的贡献率最大, 是主导影响因素, 而在攀西地区则为相对湿度。

关键词: 潜在蒸散; 气象因子; 敏感系数; 贡献率

Potential Evapotranspiration Changes and its Effects of Meteorological Factors across Sichuan Province

CHEN Dong-dong^{1,2}, WANG Xiao-dong³, WANG Sen⁴, LI Xiao-wei⁵

(1.Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration/Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072, China; 2.The Agrometeorological Center of Sichuan Province, Chengdu 610072; 3.Anhui Agrometeorological Center, Hefei 230031; 4.Xinjiang Agrometeorological Bureau, Urumqi 830002; 5.Chongqing University of Education, Chongqing 400065)

Abstract: Potential evapotranspiration (ET_0) is an important metric in measuring drought conditions for an area. Examining ET_0 changes is critical for estimating crop water demand, and thus it is crucial for improving water use efficiency in the context of global warming. Based on daily meteorological data of 151 meteorological stations in Sichuan province from 1961 to 2014, the authors calculated ET_0 with the Penman–Monteith formula for the three terrain regions of Sichuan: Sichuan basin, Panxi region and Western Sichuan Plateau, and also analyzed relative variation and sensitivity coefficients of the major meteorological factors (i.e., mean air temperature, relative humidity, radiation hours, and mean wind speed), and the spatiotemporal changes in their contribution to ET_0 changes. The results showed that ET_0 in the Sichuan basin and the Western Sichuan Plateau presented a weak declining trend, as

* 收稿日期: 2017-01-19

基金项目: 国家自然科学基金“参考作物蒸散模型的参数化研究及误差来源的定量解析 (41405111)”项目; 四川农田土壤墒情监测及预报技术的示范应用 (15010107); 高原大气与环境四川省重点实验室开放课题 (PAEKL-2017-C4)

作者简介: 陈东东 (1983-), 硕士, 主要从事农业气象科研和业务服务。E-mail: peter19831203@163.com

opposed to an increasing trend in Panxi region. In terms of spatial distribution, ET_0 was high in the Panxi region and the Western Sichuan Plateau ($1000\text{--}1350\text{mm}\cdot\text{y}^{-1}$), and it was low in the southwestern Sichuan Plateau ($651\text{--}900\text{mm}\cdot\text{y}^{-1}$), with a decreasing and then increasing gradient of ET_0 from the southwest to northeast. The effect of each meteorological factor on ET_0 (i.e., contribution of each meteorological factor to ET_0 change) was determined by their sensitivity to ET_0 and relative variation. ET_0 was most sensitive to relative humidity across the three regions, with sensitivity coefficients of -1.13 , -1.40 , -1.53 , respectively. Among all the meteorological factors, the variable with the highest long-term relative variation was mean wind speed in Sichuan basin (-29.7%) and Panxi region (-16.3%), in contrast to mean air temperature in Western Sichuan Plateau (40.4%). Further analyses suggested that the dominant factor determining ET_0 for Sichuan basin and Western Sichuan Plateau was mean wind speed, and that for Panxi region was relative humidity.

Key words: Potential evapotranspiration; Meteorological factors; Sensitivity coefficient; Contribution rate

潜在蒸散 (ET_0) 表示在一定气象条件下水分供应不受限制时, 某一固定下垫面可能达到的最大蒸散量。潜在蒸散是评价某一地区干旱程度、研究作物需水以及指导灌溉的重要因子^[1]。FAO^[2]推荐了基于气象要素的 Penman-Monteith 公式计算 ET_0 。该模型考虑了植被的生理特征, 使 ET_0 主要只受气象因子的影响, 因此, 受到国内外学者广泛应用^[3-5]。在全球变暖背景下, ET_0 的变化及其原因引起了诸多学者的讨论^[6-9]。随着研究的不断深入, 敏感性分析方法被用来研究气候要素对 ET_0 变化的影响。刘小莽等^[10]用敏感性分析法得出海河流域 ET_0 对水汽压最敏感。杨林山等^[11]得出洮河流域 ET_0 对净辐射最敏感。在山东省^[12]和松嫩平原西部^[13]用该方法得出 ET_0 对相对湿度的敏感性最高。由于研究区域以及气象因子本身的随机性和相互之间的影响, 所以不同区域 ET_0 对气象因子的敏感性也不尽相同。因此, 研究不同地区 ET_0 对气象要素敏感性分析具有重要意义^[14]。

四川省气候特点主要表现为区域差异大, 光热水的分布不均衡, 自然灾害频发, 严重制约了该地区的农业生产^[15]。因此, 研究四川省 ET_0 的时空演变特征尤为重要。虽已有学者用代表站点对四川地区 ET_0 及其影响因素作过研究^[16], 分析采用了统计相关的方法, 尽管可以反映两个变量间线性相关的强弱程度, 但并不能给出 ET_0 对气象因子改变的响应程度, 并且研究过程所用气象站点较少, 缺少系统的空间分析。另外, 由于气象因子的多年相对变化率在不同地区存在明显的差异, 仅从敏感性的角度判断 ET_0 的影响因子是不全面的, 只有将敏感性和相关因子多年相对变化率进行综合分析, 才能客观反映某一地区 ET_0 变化的主要影响因素。一些学者^[17-19]

在敏感分析的基础上进一步分析气象要素对 ET_0 变化的贡献率, 深入阐明了各气象要素对研究区域 ET_0 的影响。因此, 本文在将四川省按照不同气候类型分区域的基础上, 研究各区域 ET_0 的时空变化特征, 并着重分析 ET_0 对各气象要素的敏感性以及对 ET_0 的贡献率, 探究 ET_0 变化的主导因素, 以期农业合理布局、科学灌溉提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 研究区概况和数据来源

四川省因不同的地貌, 形成了独特的气候类型, 大致可分为四川盆地、攀西地区和川西高原 3 个区^[20] (图 1)。全省 151 个气象站点 1961–2014 年逐日平均气温、最高气温、最低气温、降水量、平均风速、日照时数、水汽压、相对湿度等资料来自四川省农业气象中心。

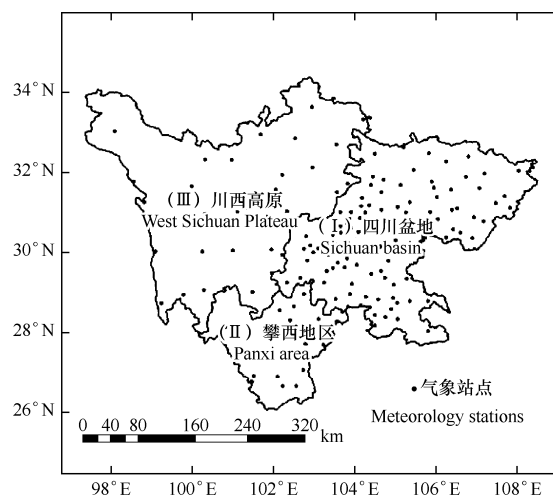


图 1 四川省气象站点分布及研究分区

Fig. 1 Distribution of meteorological stations and study subareas in Sichuan province

1.2 统计分析及空间插值方法

气象数据处理及 ET_0 、敏感系数计算使用 Matlab 软件, 利用 FAO1998 年推荐的 Penman-Monteith 方法计算逐日 ET_0 。采用 ArcGIS9.3 地统计模块中的 Kring 插值方法, 得到各要素的空间分布图。

1.3 气候倾向率

采用最小二乘法计算气候要素的变化趋势, 用 x 表示某一气候变量, 用 t 表示其所对应的时间, 建立 x 与 t 的一元线性回归方程^[21]。

$$x = at + b \quad (1)$$

以线性回归系数 a 的 10 倍作为气候要素倾向率。

1.4 气象因子的敏感性和贡献率

ET_0 对气象因子的敏感性参照文献[12-13]进行计算, 即

$$S_{V_i} = \lim_{\Delta V_i \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta ET_0 / ET_0}{\Delta V_i / V_i} \right) = \frac{\delta ET_0}{\delta V_i} \cdot \frac{V_i}{ET_0} \quad (2)$$

式中, S_{V_i} 为敏感系数, ET_0 和 ΔET_0 分别为潜在蒸散量及其变化量; V_i 和 ΔV_i 分别为第 i 个气象因子及其变化量。敏感系数为正表明 ET_0 随着气候变量的增加而增加, 为负说明 ET_0 随着气候变量的增加而减少, 敏感系数绝对值越大说明 ET_0 对气象因子的敏感性越大。

将单个气象因子的敏感系数与该要素的多年相对变化率相乘, 得到由此要素引起的 ET_0 的变化, 即为该要素对 ET_0 变化的贡献率, 贡献率为正表示该要

素的变化引起 ET_0 增加, 为正贡献; 贡献率为负表示引起 ET_0 减少, 为负贡献^[22]。即

$$\text{Con}_{V_i} = S_{V_i} \cdot \text{RC}_{V_i} \quad (3)$$

$$\text{RC}_{V_i}(\%) = \frac{n \cdot \text{Trend}_{V_i}}{|\text{av}_i|} \cdot 100 \quad (4)$$

式中, Con_{V_i} 为气象因子 V_i 对 ET_0 变化的贡献率, $\text{RC}_{V_i}(\%)$ 是 V_i 的多年相对变化率, n 取值为 54, av_i 为 V_i 的平均值, Trend_{V_i} 为 V_i 的气候倾向率, 由趋势分析法得到。以平均气温、相对湿度、日照时数、平均风速 4 个主要气象因子贡献率之和作为气象因子对 ET_0 变化的总贡献率。

2 结果与分析

2.1 各区域潜在蒸散量的时空变化特征

由图 2a 可见, 攀西地区以及川西高原南部 ET_0 值相对较高, 多在 1000~1350mm; 盆周山区为过渡地带, ET_0 多在 900~1000mm。四川盆地大部区域 ET_0 值较低, 除盆东北地区在 900~1000mm 外, 其余大部区域在 651~900mm, 大体分布从西南向东北呈现“高-低-高”趋势。1961~2014 年各区域 ET_0 平均值随年代变化 (图 2b) 表明, 四川盆地和川西高原呈现微弱的减少, 而攀西地区则呈现一定的增加, 但其变化均不明显。

对全省 1961~2014 年 ET_0 倾向率的统计分析表明 (图 2a), 共有 60 个站点通过显著性检验, 其中 40 个达到极显著水平 ($P < 0.01$), 20 个站点为显著水平 ($P < 0.05$)。全省 ET_0 空间分布存在明显的区

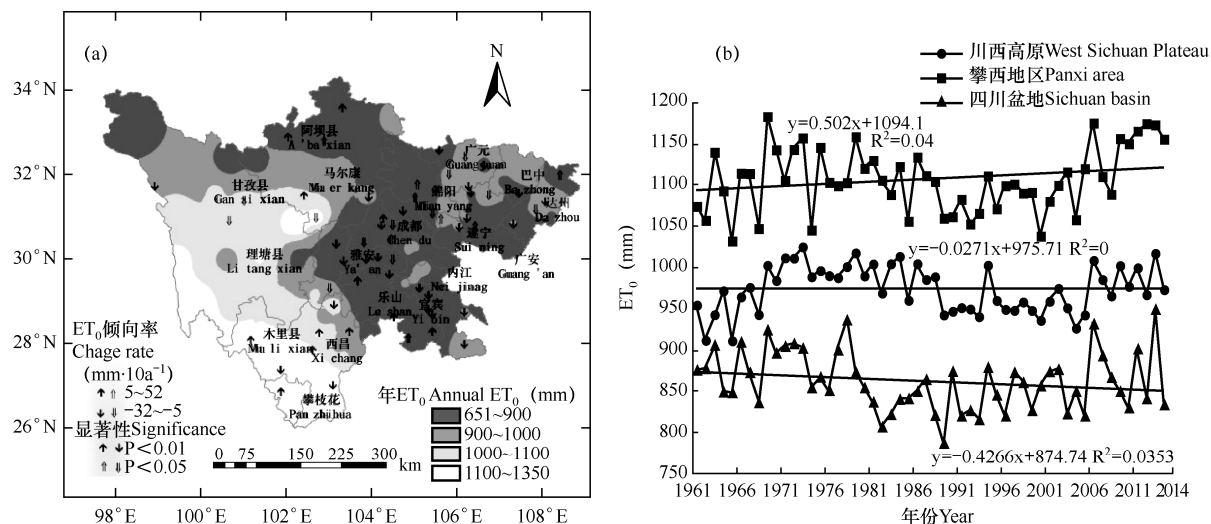


图 2 1961~2014 年年 ET_0 平均值的空间分布 (a) 及其变化趋势 (b)

Fig. 2 Spatial distribution of mean annual ET_0 (a) and ET_0 trend (b) in Sichuan province during 1961~2014

域特征,四川盆地除零星区域表现出增加趋势外,大部地区呈现减少趋势,其中苍溪县、阆中、平昌县等地区减速达 $17\text{mm}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 以上 ($P<0.01$)。攀西地区和川西高原仅炉霍县、新龙县和德格县一带表现出减少趋势,其余各地均表现增加,以攀西地区的盐边县为增加大值中心,增速达 $32\text{mm}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P<0.01$)。

2.2 各区域主要气象因子的时空变化特征

由图 3 可见,各区域主要气象因子(包括平均气温、相对湿度、日照时数和平均风速)大多表现出极显著的变化趋势 ($P<0.01$)。其中,四川盆地年平均气温表现为增加趋势,变化速率达 $0.11^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P<0.01$),相对湿度、日照时数和平均风速均呈极显著减少趋势 ($P<0.01$),速率分别为 $0.55\% \cdot 10\text{a}^{-1}$ 、 $39\text{h}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 、 $0.05\text{m}\cdot \text{s}^{-1}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 。攀西地区年平均气温表现为极显著增加趋势 ($P<0.01$),增速达 $0.19^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$,日照时数变化趋势不明显,相对湿度和平均风速均呈极显著减少趋势 ($P<0.01$),减速分别为 $0.55\% \cdot 10\text{a}^{-1}$ 、 $0.04\text{m}\cdot \text{s}^{-1}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 。川西高原地区平均气温

表现为极显著增加趋势 ($P<0.01$),增速达 $0.21^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$,相对湿度变化则不明显,日照时数和平均风速均呈极显著减少趋势 ($P<0.01$),减速分别为 $24\text{h}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 、 $0.05\text{m}\cdot \text{s}^{-1}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 。

研究期内主要气象因子多年相对变化率的空间分布见图 4。由图 4a 可见,全省平均气温变化率在 $0\sim 5\%$,仅在盆东北个别地区表现为负值,川西高原大部在 $5\%\sim 15\%$,大体呈现东西走向,即越往西相对变化率越大。相对湿度的多年相对变化率在(图 4b)川西高原大部、盆北及盆南地区为 $-4\%\sim 0$,攀西地区大部在 $-9\%\sim -4\%$,仅攀枝花局部区域在 -19% ,整体呈现从东北向西南递减。日照时数的多年相对变化率(图 4c)仅攀西地区大部表现为正值,在 $0\sim 14\%$,其余两个区域大多为负值,四川盆地多在 $-54\%\sim -10\%$,川西高原多在 $-10\%\sim 0$ 。平均风速的多年相对变化率(图 4d)除四川盆地西南部小于 -35% ,攀西地区南部及川西高原北部在 $-15\%\sim 15\%$ 外,全省其余大部地区在 $-35\%\sim -15\%$ 。

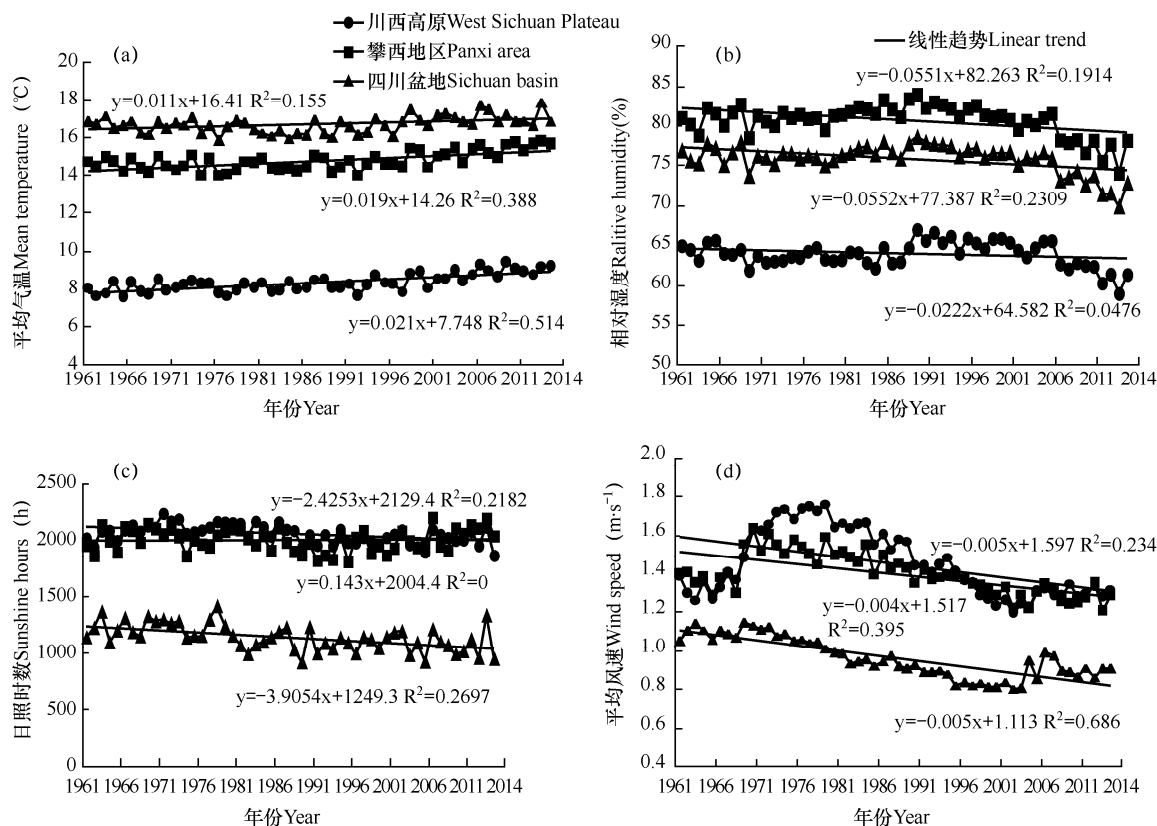


图 3 1961–2014 年四川省各区域主要气象因子年值的变化趋势

Fig. 3 Trend of annual mean meteorological factors in each study subarea during 1961–2014

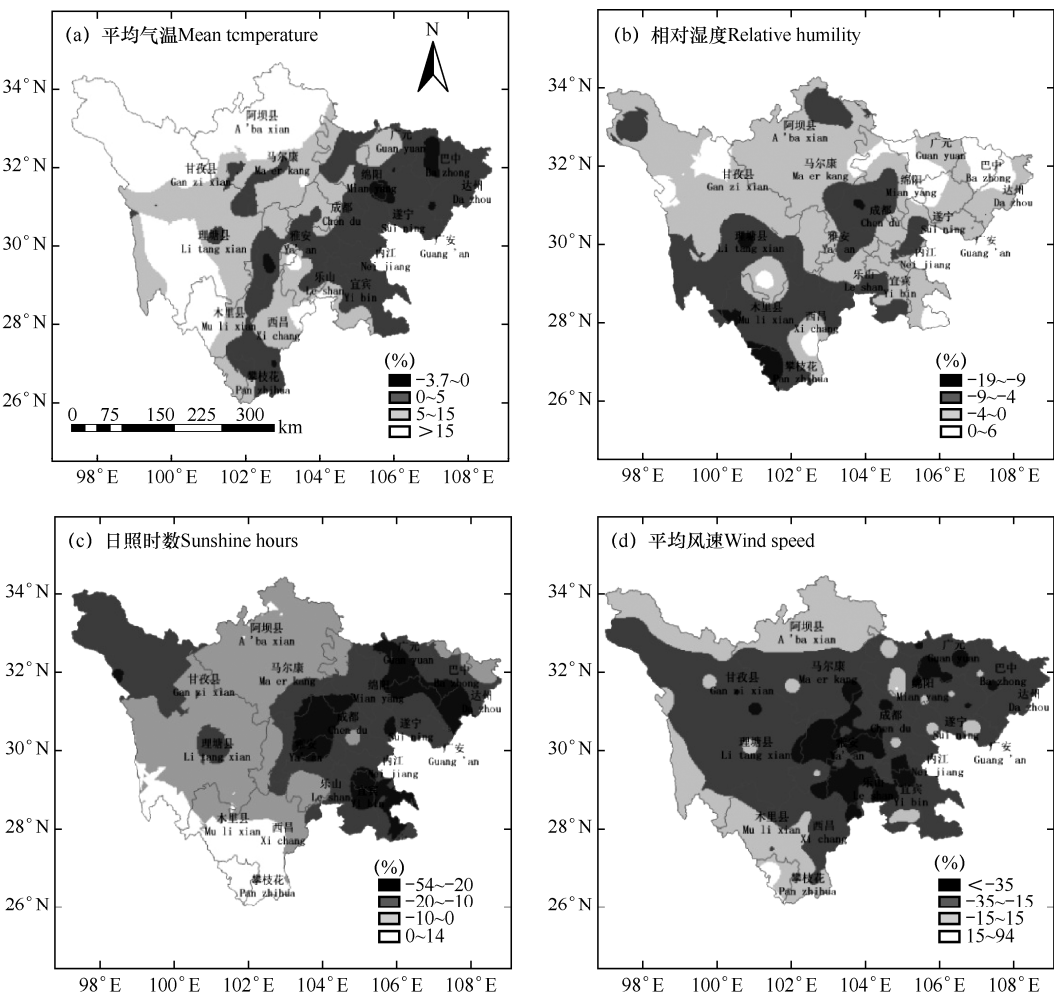


图 4 四川省主要气象因子多年相对变化率的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of long-term relative change rate for major meteorological factors in Sichuan province

由表 1 可见，四川盆地和攀西地区平均风速相对变化率的绝对值最大，其次分别是日照时数和平均气温；川西高原平均气温的相对变化率绝对值最大，其次是平均风速；各区相对湿度的相对变化率绝对值最小。说明研究期内四川省各主要气象因子中，平均风速变化最为剧烈，相对湿度的变化表现较稳定。

2.3 各区域主要气象因子的敏感性分析

由各气象要素的敏感系数结果可知（表 2），各区域除相对湿度的敏感系数为负外，其余气象要素的敏感系数为正；各区域中以相对湿度敏感系数的绝对值最大，其次是平均风速、日照时数和平均气温，说明四川省 ET_0 对相对湿度的变化最为敏感。

表 1 1961–2014 年主要气象因子多年相对变化率（%）

Table 1 Long-term relative change rate of main meteorological factors in Sichuan during 1961–2014 (%)

区域 Subarea	平均气温 Mean temperature	日照时数 Sunshine hours	平均风速 Wind speed	相对湿度 Relative humidity
四川盆地 Sichuan basin (I)	7.9	-18.5	-29.7	-3.3
攀西地区 Panxi area (II)	7.7	-0.8	-16.3	-5.2
川西高原 West Sichuan Plateau (III)	40.4	-6.7	-18.9	-3.1

注：多年相对变化率按方程（4）计算。

Note: Relative change rate is computed by equation (4).

表 2 年 ET_0 对各气象因子的敏感系数

Table 2 Sensitivity coefficients of ET_0 to meteorological factors

区域 Subarea	平均气温 Mean temperature	日照时数 Sunshine hours	平均风速 Wind speed	相对湿度 Relative humidity
四川盆地 Sichuan basin (I)	0.16	0.17	0.13	-1.13
攀西地区 Panxi area (II)	0.00	0.23	0.35	-1.40
川西高原 West Sichuan Plateau (III)	0.01	0.21	0.44	-1.53

注：敏感系数根据式 (2) 计算。

Note: Sensitivity coefficient is computed with equation (2).

由图 5 可见，各气象因子的敏感系数存在明显的地域性，其中平均气温的敏感系数（图 5a）以四川盆地最高，在 0.1~0.24；川西高原次之，大部区域在 0~0.1；攀西地区最低，多在-0.1~0。相对湿度的敏感系数（图 5b）与平均气温相似，大体从东北向西南递减，但变化幅度有所加剧，由四川盆地的-0.7 递减至川西高原西南部的-2.1，相差 3 倍。日照时数（图 5c）和平均风速（图 5d）的敏感系数则受地形影响，均呈现四川盆地小，而攀西地区和川西高原明显较高的格局。

2.4 主要气象因子对 ET_0 的贡献率分析

利用式 (2) 和 (3) 计算四川省各区域平均温度、相对湿度、日照时数和平均风速对 ET_0 的贡献率，其空间分布见图 6。图 6a 显示，全省除攀西地区西部、川西高原南部地区平均气温对 ET_0 的贡献为负，其余各地均为正贡献，多在 0~1%，仅川西高原南部相对较高，为 1%~9.4%。相对湿度对 ET_0 贡献的空间分布（图 6b）大体表现为，从西南向东北递减，攀西地区普遍较高，多在 6%~22%；盆东北区域相对湿度较低，在-11%~0。日照时数对 ET_0

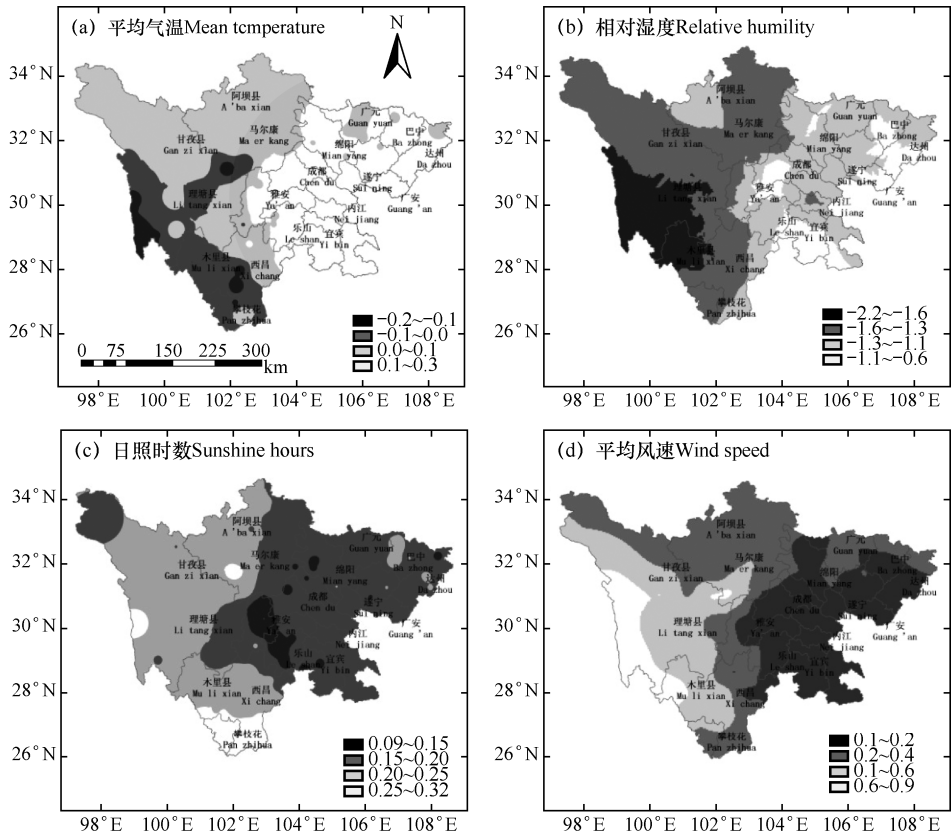


图 5 四川省主要气象因子敏感系数的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of major meteorological factors' sensitivity coefficients in Sichuan province

贡献的空间分布 (图 6c), 仅攀西地区大部为正贡献, 在 0~3.6%, 其余区域大部为负贡献, 其中四川盆地贡献率绝对值相对较大。平均风速对 ET_0 贡献的空间分布 (图 6d), 全省仅零星地区为正贡献, 绝大多数地区为负贡献。其中, 川西高原贡献率的绝对值较高。

不同区域各气象因子的贡献率也不尽相同(表 3)。以四川盆地为例, 该区域平均风速对 ET_0 贡献最大, 其次是相对湿度, 平均温度贡献最小。其中, 日照时数和平均风速为负贡献, 而平均温度和相对湿度

为正贡献, 4 个主要气象因子对 ET_0 总贡献为 -3.16%。而 54a 内 ET_0 多年相对变化率为 -2.56%, 0.6% 的变化率可能由彭曼公式中其它变量引起。同理, 其它区域亦如此。攀西地区 4 个主要气象因子对 ET_0 总贡献为 2.89%, 而 54a 内 ET_0 多年相对变化率为 2.29%; 其它因子贡献率为 -0.6%。川西高原 4 个主要气象因子对 ET_0 总贡献为 -3.6%, 而 54a 内 ET_0 多年相对变化率为 -0.07%, 其它因子贡献率为 3.53%。川西高原其它因子对 ET_0 的影响, 还需在今后的工作中深入探讨。

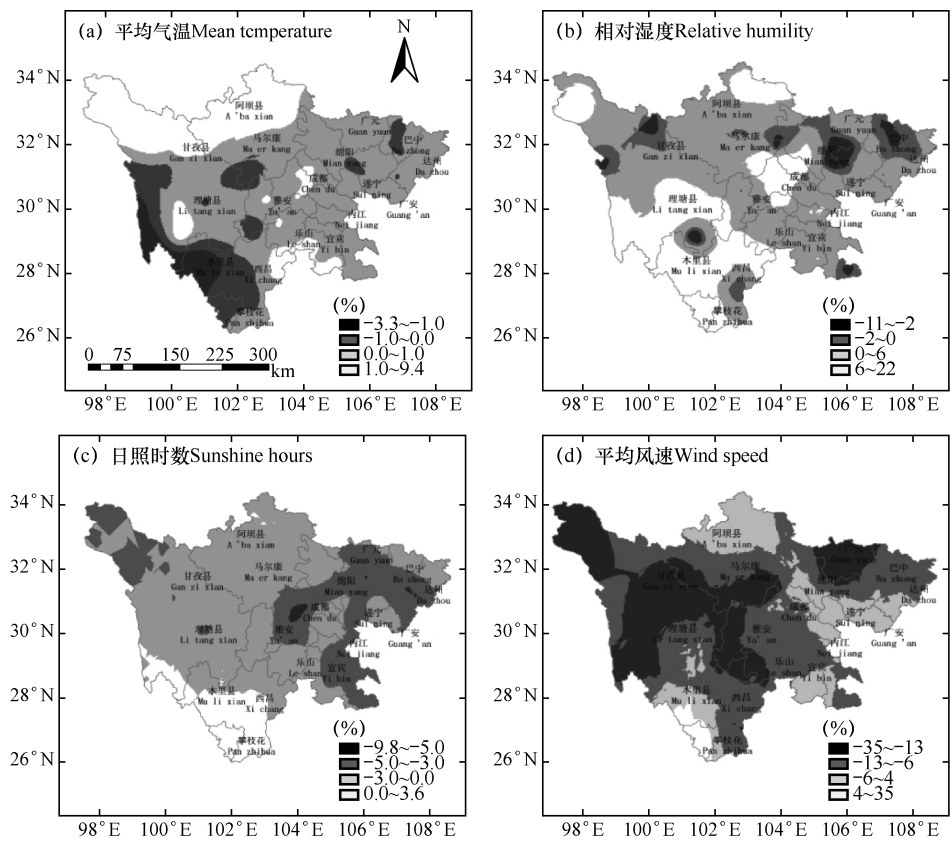


图 6 四川省主要气象因子对 ET_0 变化的贡献率分布

Fig. 6 Spatial distribution of meteorological factors' contribution rate to ET_0 changes in Sichuan province

表 3 主要气象因子对 ET_0 变化的贡献率 (%)

Table 3 Contribution rates of main meteorological factors to ET_0 changes (%)

区域 Subarea	平均气温 Mean temperature	日照时数 Sunshine hours	平均风速 Wind speed	相对湿度 Relative humidity
四川盆地 Sichuan basin (I)	0.56	-3.21	-4.11	3.60
攀西地区 Panxi area (II)	0.10	0.04	-4.13	6.88
川西高原 West Sichuan Plateau (III)	0.99	-1.36	-7.89	4.66

注: 贡献率按式 (3) 计算。

Note: Contribution rate is computed with equation (3).

综合以上分析可知,主要气象因子对 ET_0 的贡献取决于两方面, ET_0 对气象因子的敏感性和气象因子自身随时间变化的趋势。如四川盆地,虽然其相对湿度的敏感系数最大,但是其自身变化趋势最小;风速虽然敏感系数次之,但自身变化趋势最显著,综合作用使平均风速对 ET_0 的贡献最大。同样,相对湿度贡献其次,贡献最小的是温度。四川盆地和川西高原 4 个主要气象因子对 ET_0 变化的负贡献率大于正贡献率,而攀西地区则正贡献率大于负贡献率,这在一定程度上定量解释了盆地和川西高原的 ET_0 多年平均值呈下降的现象,而攀西地区呈现升高趋势。

3 结论与讨论

(1) 四川省多年平均 ET_0 在四川盆地和川西高原呈现微弱减少,而攀西地区则呈一定的增加;其空间分布从西南向东北大体呈现“高-低-高”格局。气候倾向率分析表明,四川盆地大部呈现明显减少趋势,攀西地区和川西高原多呈现增加趋势。

(2) 各区域相对湿度的敏感系数均为负且绝对值最大,说明四川省 ET_0 对相对湿度的变化最为敏感。各气象要素敏感系数空间分布区域特征明显,平均气温和相对湿度表现为四川盆地高,攀西地区和川西高原两地相对较低,而日照时数和平均风速刚好相反。各区域主要气象要素变化趋势一致,其中,平均温度为增加趋势,相对湿度、日照时数和平均风速均呈减少趋势。

(3) 各区域主要气象要素对 ET_0 贡献也不尽相同,其中四川盆地和川西高原平均风速对 ET_0 贡献最大。其次是相对湿度,平均温度贡献率最小。在这两个区域,平均气温均呈显著上升趋势,但气温升高对参考作物蒸散量变化的作用有限, ET_0 并未因变暖而增大,反而随着风速下降和日照时数减少呈下降趋势。这一结论与一些学者^[23-24]研究结果一致。攀西地区则是相对湿度是对潜在蒸散贡献最大,其次是平均风速,日照时数贡献率最小。以盆地为例,主要气象因子对 ET_0 的变化总贡献率为-3.16%,在很大程度上解释了 ET_0 下降的原因,相较仅从敏感性判断 ET_0 的主要影响因素是相对湿度更全面。

ET_0 的计算对于科学估算作物需水量,提高水分利用率具有十分重要的意义。在全球气候变暖趋势下,在缺少实际资料的地区,计算 ET_0 显得更加重要。本文利用彭曼公式,研究四川省多年平均 ET_0 变化规

律及空间分布特征,定量分析了不同区域各气象要素对 ET_0 变化的贡献率。这较陈超等^[16]利用偏相关分析四川地区 ET_0 的变化特征更加客观、全面。主要表现在:一是区域的进一步细化。前者将四川分成盆地和高原两部分,而本文按照气候特征类型将研究区分成四川盆地、攀西地区和川西高原 3 个区域,区域划分更合理。原因在于攀西地区属于干湿季节分明的季风气候,与川西高原典型的高原大陆性气候差异较大,故将其单独分析。二是增加了各气象要素空间特征分析。利用 151 个气象站点将各气象要素进行空间插值分析,较前者研究使用代表站点更具代表性。三是贡献率的分析使 ET_0 变化的影响因素有了定量的指标。最后,从分析结果来看,在川西高原引起 ET_0 变化的主导因子得出的结论一致;而在四川盆地则结论不同,前者得出的主导因子是日照时数,本文得出的结论是平均风速。分析其原因,如果仅从相关性分析日照时数和平均风速的变化趋势都是极显著,而从相对变化率上来看平均风速要远大于日照时数,贡献率的分析综合了气象要素的相对变化,能客观定量地衡量 ET_0 的改变,因此本文通过计算贡献率得出的结果更加客观。

有研究表明^[25],从年尺度上,四川地区季节性干旱特征表现为:干旱频率和强度均呈西高东低的带状分布,高发区主要在川西高原、川西南山地。这一特点和四川地区 ET_0 的空间分布基本一致,这也说明 ET_0 的变化与该地区干旱有着密切的联系。研究结果显示,四川盆地和川西高原 ET_0 均呈降低趋势,这将导致作物年需水量的降低,在一定程度上降低了季节性干旱带来的影响。而在攀西地区 ET_0 表现为增加,在作物系数不变的前提下,该区域的农作物需水也随之增大,作物的稳产则更依赖灌溉,所以现有的种植模式和农艺措施拟进行调整,如采取水稻旱育秧技术,玉米集中育苗移栽技术,秸秆覆盖技术等,以提高水分利用效率。

本文不足之处在于采用平均 ET_0 在时间跨度上较大,而四川地区是典型的季节干旱频发区,在今后的研究中可通过分析 ET_0 的季节变化特征,以更好地指导实际生产。

参考文献 References

- [1] 尹云鹤,吴绍洪,戴尔阜.1971-2008 年我国潜在蒸散时空演变的归因[J].科学通报,2010,55(22):2226-2234.

- Yin Y H, Wu S H, Dai E F. Determining factors in potential evapotranspiration changes over China in the period 1971-2008[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(22): 2226-2234. (in Chinese)
- [2] FAO. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements[R]. Rome: Food and Agriculture Organization, 1998.
- [3] Chen D, Gao G, Xu C Y, et al. Comparison of Thornthwaite method and pan data with the standard Penman-Monteith estimates of potential evapotranspiration for China[J]. Climate Research, 2005, 28: 123-132.
- [4] 马宁, 王乃昂, 王鹏龙, 等. 黑河流域参考蒸散量的时空变化特征及影响因素的定量分析[J]. 自然资源学报, 2012, 27(6): 975-989.
- Ma N, Wang N A, Wang P L, et al. Temporal and spatial variation characteristics and quantification of the affect factors for reference evapotranspiration in Heihe River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(6): 975-989. (in Chinese)
- [5] 曹雯, 申双和, 段春峰. 中国西北潜在蒸散时空演变特征及其量化成因[J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3394-3403.
- Cao W, Shen S H, Duan C F. Temporal-spatial variations of potential evapotranspiration and quantification of the causes in Northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(11): 3394-3403. (in Chinese)
- [6] 李春强, 洪克勤, 李保国. 河北省近 35 年(1965-1999)参考作物蒸散量的时空变化分析[J]. 中国农业气象, 2008, 29(4): 414-419.
- Li C Q, Hong K Q, Li B G. Analysis of temporal spatial variations of reference evapotranspiration during 1965 to 1999 in Hebei Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2008, 29(4): 414-419. (in Chinese)
- [7] 刘园, 王颖, 杨晓光. 华北平原参考作物蒸散量变化特征及气候影响因素[J]. 生态学报, 2010, 30(4): 923-932.
- Liu Y, Wang Y, Yang X G. Trends in reference crop evapotranspiration and possible climatic factors in the North China Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(4): 923-932. (in Chinese)
- [8] 王潇潇, 潘学标, 顾生浩, 等. 内蒙古地区参考作物蒸散变化特征及其气象影响因子[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 1): 142-152.
- Wang X X, Pan X B, Gu S H, et al. Trend in reference crop evapotranspiration and meteorological factors affecting trends in Inner Mongolia[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Suppl): 142-152. (in Chinese)
- [9] 谢贤群, 王菱. 中国北方近 50 年潜在蒸散量的变化[J]. 自然资源学报, 2007, 22(5): 683-691.
- Xie X Q, Wang L. Changes of potential evaporation in Northern China over the past 50 years[J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(5): 683-691. (in Chinese)
- [10] 刘小莽, 郑红星, 刘昌明, 等. 海河流域潜在蒸散的气候敏感性分析[J]. 资源科学, 2009, 31(9): 1470-1476.
- Liu X M, Zheng H X, Liu C M, et al. Sensitivity of the potential evapotranspiration to key climatic variables in the Haihe River Basin[J]. Resources Science, 2009, 31(9): 1470-1476. (in Chinese)
- [11] 杨林山, 李常斌, 王帅兵, 等. 洮河流域潜在蒸散的气候敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 102-109.
- Yang L S, Li C B, Wang S B, et al. Sensitive analysis of potential evapotranspiration to key climatic factors in Taohe River Basin[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(11): 102-109. (in Chinese)
- [12] 董旭光, 顾伟宗, 王静, 等. 影响山东参考作物蒸散量变化的气象因素定量分析[J]. 自然资源学报, 2015, 30(5): 810-823.
- Dong X G, Gu Z W, Wang J, et al. Quantitative analysis of climate factors for potential evapotranspiration changes in Shandong[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(5): 810-823. (in Chinese)
- [13] 梁丽乔, 李丽娟, 张丽, 等. 松嫩平原西部生长季参考作物蒸散量的敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 1-5.
- Liang L Q, Li L J, Zhang L, et al. Sensitivity of the reference crop evapotranspiration in growing season in the West Songnen Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(5): 1-5. (in Chinese)
- [14] 赵彩霞, 梅旭荣, 居辉, 等. 黄淮海平原各农业亚区潜在蒸散量变化及其对气候要素的敏感性分析[J]. 中国农业气象, 2015, 36(5): 570-577.
- Zhao C X, Mei X R, Ju H, et al. Variation in potential evapotranspiration and its sensitivity coefficients to climatic factors in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36(5): 570-577. (in Chinese)
- [15] 陈淑全. 四川气候[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1997.
- Chen S Q. Climate of the Sichuan[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technical Press, 1997. (in Chinese)
- [16] 陈超, 庞艳梅, 潘学标, 等. 四川地区参考作物蒸散量的变化特征及影响因素分析[J]. 中国农业气象, 2011, 32(1): 35-40.
- Chen C, Pang Y M, Pan X B, et al. Analysis on change of reference crop evapotranspiration and climatic influence factors in Sichuan[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011, 32(1): 35-40. (in Chinese)
- [17] 李思思, 张飞云, 白磊, 等. 北疆地区生长季参考作物蒸散量的时空变化特征及其敏感性分析[J]. 中国农业气象, 2015, 36(6): 683-691.
- Li S S, Zhang F Y, Bai L, et al. Spatiotemporal variation and sensitivity of reference crop evapotranspiration during

- growth season in Northern Xinjiang[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2015,36(6):683-691.(in Chinese)
- [18]王晓东,马晓群,许莹,等.淮河流域参考作物蒸散量变化特征及主要因子的贡献分析[J].中国农业气象,2013,34(6):661-667.
- Wang X D,Ma X Q,Xu Y,et al.Variation of reference crop evapotranspiration and contribution of main factors in the Huaihe Basin[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2013,34(6):661-667.(in Chinese)
- [19]李英杰,延军平,王鹏涛.北方农牧交错带参考作物蒸散量时空变化与成因分析[J].中国农业气象,2016,37(2):166-173
- Li Y J,Yan J P,Wang P T.Temporal and spatial change and causes analysis of the reference crop evapotranspiration in farming-pastoral ecotone of northern China[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2016,37(2):166-173.(in Chinese)
- [20]陈东东,程路,栗晓玮,等.基于地统计学的四川省降雨侵蚀力时空分布特征[J].生态学杂志,2014,33(1):206-213.
- Chen D D,Cheng L,Li X W,et al.Spatiotemporal distribution of rainfall erosivity based on geostatistics of Sichuan Province[J].Chinese Journal Ecology,2014,33(1):206-213.(in Chinese)
- [21]任国玉,吴虹,陈正洪.我国降水变化趋势的空间特征[J].应用气象学报,2000,11(3):322-330.
- Ren G Y,Wu H,Chen Z H.Spatial patterns of change trend in rainfall of China[J].Quarterly Journal of Applied Meteorology,2000,11(3):322-330.(in Chinese)
- [22]吴文玉,孔芹芹,王晓东,等.安徽省近40年参考作物蒸散量的敏感性分析[J].生态环境学报,2013,22(7):1160-1166.
- Wu W Y,Kong Q Q,Wang X D,et al.Sensitivity analysis of reference crop evapotranspiration in Anhui Province in the recent 40 years[J].Ecology and Environmental Sciences,2013,22(7):1160-1166.(in Chinese)
- [23]姬兴杰,朱亚玉,顾万龙.河南省参考作物蒸散量的变化特征及其气候影响分析[J].中国农业气象,2013,34(1):14-22.
- Ji X J,Zhu Y Y,Gu W L.Analysis on trends in annual reference crop evapotranspiration and its impact climatic factors in Henan province during 1971 to 2010[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2013,34(1):14-22.(in Chinese)
- [24]王琼,张明军,潘淑坤,等.长江流域潜在蒸散量时空变化特征[J].生态学杂志,2013,32(5):1292-1302.
- Wang Q,Zhang M J,Pan S K,et al.Spatiotemporal variation patterns of potential evapotranspiration in the Yangtze River Basin of China[J].Chinese Journal Ecology,2013,32(5):1292-1302.(in Chinese)
- [25]王明田,蔡元刚,张玉芳,等.基于相对湿度指数的四川省季节性干旱时空分布特征[J].西南农业学报,2014,27(4):1715-1722.
- Wang M T,Cai Y G,Zhang Y F,et al.Spatial and temporal distribution of seasonal drought in Sichuan based on relative moisture index[J].Southwest China Journal of Agricultural Science,2014,27(4):1715-1722.(in Chinese)